

УДК 539.43.620.17

В.В. Касперская, канд.техн.наук, А.Д. Погребняк, канд.техн.наук, М.Н. Регульский, канд.техн.наук  
Институт механики им. С.П.Тимошенка НАН Украины, г. Киев, Украина

## ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ АСИММЕТРИЧНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

*Розглядається задача оцінки та прогнозування граничного стану алюмінієвих сплавів за умов багаточислового асиметричного навантаження розтягом-стиском. Визначається вплив концентрації напружень на діаграми граничного стану.*

*The problem of fatigue strength calculation of aluminum alloys under combined action of static and cyclic loading has been solved. The calculation was made based on models of ultimate state allowing to describe all known forms of stress-range diagrams.*

**Введение.** Создание современных машиностроительных конструкций неразрывно связано с всесторонним исследованием используемых конструкционных материалов. Широкое применение в авиастроении, судостроении и других отраслях техники в настоящее время находят алюминиевые сплавы. В процессе эксплуатации многие элементы конструкций подвергаются весьма сложному комплексу силовых воздействий, включающему, как правило, статические и циклические нагрузки, формирующие асимметричные циклы нагружения.

Предельное состояние исследуемых материалов в этих условиях нагружения отражают изохронные диаграммы предельных амплитуд напряжений. Их построение основывается на результатах весьма трудоемких и длительных усталостных испытаний. В связи с этим в расчетной практике широко используются различного рода аналитические зависимости, характеризующие предельное состояние в условиях асимметричного нагружения. Эти зависимости содержат характеристики материалов, получаемые, как правило, на основе стандартных испытаний на кратковременную прочность и усталость при симметричном цикле нагружения. Наибольшую известность получили линейная и параболическая зависимости [1, 2]. Однако, как свидетельствует анализ многочисленных экспериментальных данных, формы диаграмм предельных напряжений изменяются в довольно широких пределах. Поэтому указанные зависимости не всегда обеспечивают точность оценки предельного состояния конструкционных материалов. Более того, концентраторы напряжений, присущие элементам конструкций, снижают их сопротивление усталости, что не отражают известные зависимости, описывающие предельное состояние.

В работе [3] предложены модели предельного состояния, позволяющие описывать разнообразие диаграмм предельных амплитуд напряжений. Ниже они используются для оценки сопротивления усталости и построения диаграмм предельных амплитуд напряжений для гладких и надрезанных образцов ряда алюминиевых сплавов применительно к многоциклового асимметричному нагружению растяжением-сжатием, отражающему во многих случаях реальное нагружение элементов конструкций в эксплуатационных условиях.

**Постановка задачи. Исходные соотношения.** Рассматривается усталостное разрушение гладких образцов и образцов с концентратором напряжений ряда алюминиевых сплавов в условиях многоциклового асимметричного нагружения растяжением – сжатием. При этом номинальные напряжения в исследуемых образцах не превышают макроскопический предел прочности  $\sigma_B$ , а усталостное разрушение не сопровождается накоплением циклических пластических деформаций и

является квазихрупким. Рассматривается область комнатных и низких гомологических температур, при которых не проявляются временные эффекты.

Общеизвестно, что концентрация напряжений, как правило, снижает сопротивление усталости металлических материалов. В связи со сложностью и большой трудоемкостью оценки их предельного состояния при асимметричном нагружении на основе лабораторных испытаний представляет практический интерес его определение расчетным путем с использованием предложенных моделей и установление степени влияния концентрации напряжений на формы диаграмм предельных амплитуд напряжений.

Задача заключается в оценке и прогнозировании предельного состояния алюминиевых сплавов путем построения диаграмм предельных амплитуд напряжений и в установлении влияния на их формы концентрации напряжений.

Решение задачи основывается на использовании моделей предельного состояния [3, 4], построенных на основе гипотезы единой предельной диаграммы, инвариантной числу циклов до разрушения.

Расчет предельного состояния осуществляли, используя зависимости для приближенных оценок, обеспечивающих достаточно высокую степень точности

$$\sigma_a = \sigma_n \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left( \frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_B} \right)^4 \right]^\lambda \quad (1)$$

$$\sigma_a = \sigma_n \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi - \frac{1}{3\pi} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$  – циклическая и статическая составляющие асимметричного цикла нагружения,  $\sigma_n$  – предел (ограниченный предел) выносливости при симметричном цикле,  $\sigma_B$  – предел кратковременной прочности;  $\lambda$  и  $\xi$  – коэффициенты, характеризующие чувствительность материала к асимметрии нагружения.

Значения  $\sigma_n$  и  $\sigma_B$  определяются на основе стандартных испытаний на кратковременную прочность и усталость соответственно гладких цилиндрических или надрезанных образцов в зависимости от решаемой задачи.

Для определения коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$  проводится единичный базовый эксперимент при отнулевом ( $\sigma_a = \sigma_m$ ) асимметричном цикле нагружения.

Значения коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$  рассчитывали, используя выражения

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_a^0 - \lg \sigma_{-1}^0}{\lg \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B} \right) \right]} \quad (3)$$

и

$$\xi = \frac{\lg \frac{\sigma_a^0}{\sigma_{-1}^0} - \lg \frac{2}{\pi}}{\lg \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m^0}{\sigma_B} \right) \right]}, \quad (4)$$

где  $\sigma_a^0$  и  $\sigma_m^0$  – амплитуда и статическая компоненты асимметричного отнулевого цикла нагружения в базовом эксперименте;  $\sigma_{-1}^0$  – предел (ограниченный предел) выносливости при симметричном цикле нагружения, соответствующий долговечности  $n_R^0$  под действием комбинации напряжений  $\sigma_a^0$  и  $\sigma_m^0$ .

Расчет усталостной прочности при асимметричном нагружении. Выполненные ранее исследования по расчету предельного состояния ряда алюминиевых сплавов [4] показали, что выбор модели предельного состояния определяется механическими свойствами исследуемых материалов и, прежде всего, их пластичностью. Для пластичных материалов (углеродистых, низколегированных сталей, сплавов меди, магния) экспериментальные данные лучше описывает модель (1), для малопластичных (высокопрочных, сложнелегированных сталей, чугунов, никелевых, титановых сплавов) – модель (2). В первом приближении выбор модели основывается на результатах базового эксперимента и расчета коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$ .

Результаты расчетов диаграмм предельных амплитуд напряжений пластичных материалов свидетельствуют о том, что коэффициент  $\lambda$  в этом случае, обеспечивающий адекватное описание экспериментальных данных обычно больше единицы. Удовлетворительное описание результатов усталостных испытаний хрупких, малопластичных материалов обеспечивает коэффициент  $\xi < 0,75$ . В области коэффициентов  $\lambda < 1$  и  $\xi > 0,75$  обе зависимости обеспечивают хорошее согласование расчета и эксперимента.

Ниже представлены результаты расчетной оценки предельного состояния алюминиевых сплавов 14S-T6, 24S-T4 и 75S-T6 и сопоставление с данными экспериментальных исследований гладких и надрезанных образцов в широком диапазоне изменений статической составляющей асимметричного цикла нагружения [5]. Для исследованных сплавов характерно относительно незначительное различие в значениях предела кратковременной прочности, в то же время в этом ряду более низким значением предела текучести и более высокой пластичностью выделяется сплав 24S-T4.

Авторы испытывали гладкие образцы и две группы образцов с концентратором напряжений. Концентратор выполнялся в виде V-образного надреза с радиусом при вершине  $\rho = 0,8$  мм (первая группа) и  $\rho = 0,25$  мм (вторая группа). В этом случае теоретический коэффициент концентрации  $\alpha_\sigma$  для первой группы образцов равен 2,4, для второй – 3,4.

Механические свойства исследованных сплавов, коэффициенты чувствительности к асимметрии цикла нагружения  $\lambda$  и  $\xi$ , использованные при выполнении расчетов, приведены в таблице.

Таблица

Характеристики кратковременной прочности алюминиевых сплавов и значения коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\lambda$	$\xi$
14S-T6	494	438	13,6	-	0,71
24S-T4	502	335	21,4	1,82	-
75S-T6	567	489	16,5	-	0,21

На рис. 1 представлены результаты расчета диаграмм предельных амплитуд напряжений (линии)

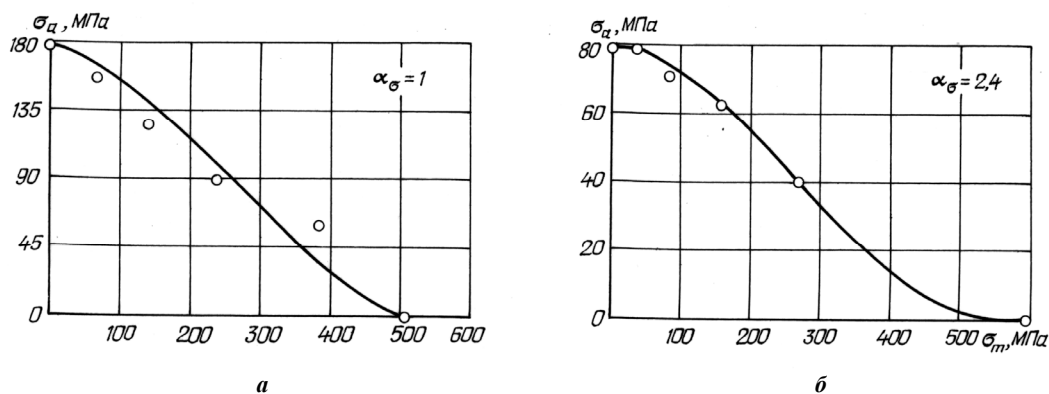


Рис. 1. Диаграммы предельных амплитуд напряжений гладких (а) и надрезанных (б) образцов сплава 24S-T4

для гладких (а) и надрезанных (б) образцов сплава 24S-T4.

Учитывая рекомендации [4] и повышенную пластичность сплава, в данном случае расчеты выполнены с использованием зависимости (1). Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными (точки) применительно к долговечности  $n = 10^7$  циклов.

Форма диаграмм близка к линейной или s-образной. В первом случае – для гладких образцов по результатам базового эксперимента получено значение коэффициента  $\lambda = 1,82$ , во втором – для надрезанных образцов – 2,48.

Рис. 2, 3 отражают результаты расчета диаграмм предельных амплитуд напряжений (линии) для гладких (а) и надрезанных (б) образцов сплавов 14S-T6 и 75S-T6 соответственно в сопоставлении с данными экспериментов (точки).

Учитывая относительно невысокую пластичность (см. таблицу), расчеты выполнены с использованием зависимости (2). В данном случае также получено хорошее согласование расчета с экспериментальными данными. Форма диаграммы для гладких образцов сплава 14S-T6 (см. рис. 2,а) близка к линейной – коэффициент  $\xi$ , отражающий форму диаграммы, равен 0,71. Для надрезанных образцов (см. рис.2,б) форма диаграммы s-образна с весьма заметным снижением амплитуд напряжений асимметричного цикла в области небольших значений статической компоненты. Коэффициент  $\xi$  для надрезанных образцов с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 2,4$  (см. рис.2,б, сплошная линия) снижается за счет надреза до 0,39 по сравнению со значением  $\xi$  для гладких образцов. Повышение коэффициента  $\alpha_\sigma$  до 3,4 приводит к уменьшению показателя степени  $\xi$  в зависимости (2) до значения 0,34, косвенно отражающем дальнейшее снижение амплитуды асимметричного цикла в этом случае (см. рис. 2,б, пунктирная линия).

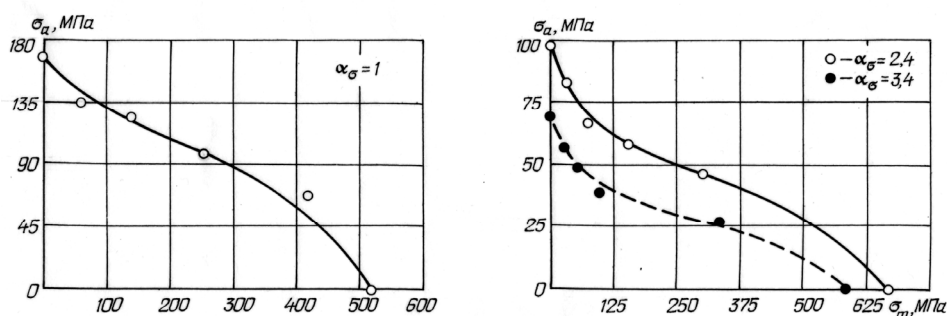


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд напряжений гладких (а) и надрезанных (б) образцов сплава 14S-T6.

Для сплава 75S-T6 форма диаграммы предельных амплитуд напряжений как для гладких образцов (см. рис.3,а), так и для образцов с надрезом, которому соответствует коэффициент  $\alpha_k = 3,4$ , (см. рис.3,б), в большей степени является вогнутой, особенно в области относительно небольших значений статической компоненты.

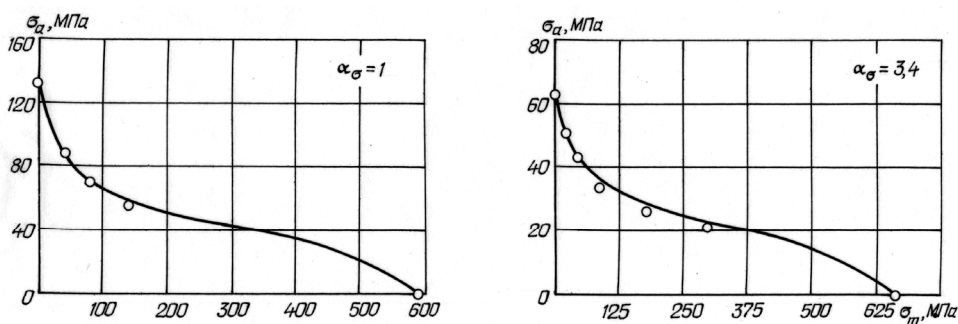


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд напряжений гладких (а) и надрезанных (б) образцов сплава 75S-T6

**Обсуждение результатов.** Сопоставление результатов расчетов предельного состояния гладких и надрезанных образцов алюминиевых сплавов с использованием моделей предельного состояния показало удовлетворительное согласование с экспериментальными данными для исследованных материалов. Степень точности согласования с известными экспериментальными данными, определяемая величиной погрешности  $\delta$ , не превышает по напряжениям 5%. Максимальная погрешность получена для сплава 24S-T4 в области статических напряжений эксплуатационного диапазона; она составляет 13%.

Концентрация напряжений приводит к снижению сопротивления усталости исследуемых сплавов, как при симметричном, так и при асимметричных циклах нагружения. Концентратор напряжений незначительно сказывается на форме диаграмм предельных амплитуд напряжений, смещая ее в сторону меньших амплитуд вдоль оси ординат, что находит свое отражение в изменении коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$  в зависимостях (1) и (2). Чем более острым выполнен надрез, тем больше теоретический коэффициент концентрации напряжений и тем большее получено снижение амплитудных значений напряжений асимметричного цикла, особенно в области относительно небольших значений статической составляющей цикла нагружения, что в свою очередь приводит к изменению предельного состояния. В связи с этим, с целью оценки и прогнозирования предельного состояния конструкционных материалов с использованием предложенных моделей, необходимо проведение базового эксперимента при отнулевом цикле асимметричного нагружения каждой конкретной партии образцов исследуемого материала для определения показателей степени в моделях, отражающих его чувствительность к асимметрии нагружения.

**Заключение.** Выполнены расчеты и построение диаграмм предельных амплитуд напряжений для гладких и надрезанных образцов ряда алюминиевых сплавов, продемонстрировавших возможности оценки предельного состояния с использованием предложенных моделей. Их параметры  $\lambda$  и  $\xi$  выступают в роли дополнительных материальных констант и определяют форму диаграмм предельных амплитуд напряжений. Концентрация напряжений в виде надрезов не вносит принципиальных отличий в форму диаграмм предельных амплитуд напряжений.

Предложенный подход может быть использован для оценки предельного состояния алюминиевых сплавов с достаточно высокой степенью точности при минимальном объеме экспериментальных исследований.

### Список литературы

1. Гаф Г.Дж. Усталость металлов // Пер.с англ. под ред. Н.А.Шапошникова.– Л.-М.: Гл. ред. лит. по черной металлургии, 1935.–304 с.
2. Форрест П. Усталость металлов // Пер. с англ. Под ред. С.В.Серенсена.– М.: Машиностроение, 1968.– 352с.
3. Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении-сжатии // Прикл. механика.- 2006.- Том 42, № 1.– С.48–58.
4. Желдубовский А.В., Погребняк А.Д., Регульский М.Н. Расчет предельного состояния алюминиевых сплавов при асимметричном циклическом растяжении-сжатии // Пробл. прочности.- 2006.- № 4.- С. 148-155.
5. Lazan B.J., Blatherwick A.A. Strength properties of rolled aluminum alloys under various combination of alternating and mean fatigue stresses // Proc. ASTM.- 1953.-Vol.53.- P.856–870.